

Jahresbericht 1949
des Elektrotechnischen Laboratoriums
Gruppe Holter / Bearbeiter Jahn.

A) Drehstrom-Netzmodell.

Als Hauptaufgabe bestand die Erweiterung der Modellanlage durch den Drehstromteil. Die bereits im Jahre 1948 durchgeföhrten Planungen wurden erweitert und zur Ausführung gebracht.

1. Schaltanlage

Die Netzmodell-Schalttafel nach Schaltbild OB 402-82-2959 gestattet alle für den Betrieb des Drehstrommodells benötigten Anlageteile jeweils nach den Erfordernissen der Schaltung zentral zu bedienen. Sie hat 7 Felder und ist in dem Bericht H 72 nach der schalttechnischen und der konstruktiven Seite beschrieben. Zu schließen sich die beiden Motor-Generatoren und der Phasenschieber an. Die Generatoren und der Phasenschieber (nach Bericht H 164) wurden bei dem Büro für Elektrische Maschinen hergestellt und kommen leider erst Ende November zur Ablieferung, so daß es noch möglich ist, mit ihnen Versuche durchzuföhrn. Die Schaltanlage wird ergänzt durch die Kurzschluß- und Belastungsdruckeln (nach A/T 50), durch den Synchron-Umformer, den Kollektor-Gleichrichter und die Blindleistungsbatterie.

2. Leitungsmodell.

Den zweiten Hauptteil des Drehstromnetzmodells bildet das Leitungsmodell nach (A/T 42 und A/T 56), das die Nachbildung von 800 km 110.000 V Doppelleitung darstellt. Dieses Modell nach Artennotiz ist nach Bericht H 72 ausgeführt, daß verschiedene Netznachbildungen mit einfachen Umschaltungen durch Laschen hergestellt werden können. Für das Schalten der Fehler (insbesondere Kurzschlüsse) wurde von der Gruppe H 81 ^{durch} der Synchron-Khrenschalter gebaut. Als vielseitig schaltbarer ohmischer Verbraucher wurde ein dreiphasiger Regelwiderstand nach Artennotiz A/T 61 erstellt.

SECRET
S/L WHE

A) Schutzeinrichtungen

Neben den Erweiterungen zur Modellanlage liefen Untersuchungen und Entwicklungen für die Verbesserung der magnetischen Schutzrelais. So wurde zunächst in Zusammenarbeit mit den KAW ein neues Gitteraparr-Relais entwickelt, das für die Gleichrichtereinheiten 307-1/8 verwendet wird. Angaben über diese Relais enthält der Bericht Nr. 127 des Herrn Sauer, sowie das Datenblatt GB/TB 490629.

Darauf wurde ein magnetischer Rückbildungsschutz für die Gleich- und Hochalrichter der Höchstspannungs-Gleichstrom-Bertragung entworfen und untersucht. Die erzielten Ergebnisse sind in dem Bericht H 70 zusammengestellt.

B) Sonstige thematische Arbeiten

Die Entwicklung der Modellanlage und der Schutzrelais konnte leider nicht mit größerer Ausführlichkeit durchgeführt und beschrieben werden, weil der Berichter durch organisatorische Aufgaben des Büros stark in Anspruch genommen war. Im besonderen oblagen ihm die ordnungsgemäßen Verpackungen und Versendungen der Ergebnisse des Gleichrichterbüros, wofür vielfach besondere Anstrengungen geschaffen werden mussten. So wurde im Anfang August 1948 ein Gleichrichterzug mit während der Fahrt nach Rußland ausgelieferten Gleichrichtern E.MG 1/1 und 2/1 ausgerüstet, für deren Versorgung ebenso wie im Jahre 1948 2 Diesel-elektrische Antriebe zum Einsatz gelangten.

C) Außerthematische Arbeiten

Der Berichter beteiligte sich an den Entwurfsarbeiten für eine Münchener Anlage nach Bericht S 64.

22.11.49
F.W.

SECRET

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010005-2

25X1A



Der Stand der Stromrichtertechnik
in Deutschland und ihre Entwicklung
in der nächsten Zukunft.

7402-2449

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010005-2

Sekundärstrom der Drehstromwandler	0,028 A
Leistung " "	2 VA
Überstromziffer " "	grösser als 15
Hilfstrom des Gleichstromwandlers	2 A
Übersetzung des Zusatzwandlers	2/0,043 A
Leistung " "	3,6 VA
Überstromziffer	grösser als 5

Motors

Anzuge- und Haltespule
für 220 V We

6000 Wdg 0,1 mm² CuL 650 Ohm
650 Ohm (3 W)

Verwiderstand

8500 Ohm (3 W)

Haltespulen

1000 Aw

Ansiehen

135 Aw

Halten

6,5 V (0,032 A)

Gegenspule

1600 Wdg 0,1 mm² CuL 200 Ohm

45 Aw

Ansprechen

2000 Ohm (3 W)

Verwiderstand R_v

2 uF 400 V We

Dämpfungskreis C

Prüfspannung 1200 V We

R_o

3 kOhm (3 W)

Überspannungsableiter

R_u

900 Ohm

1. Zweck und Arten der Stromrichter.

Stromrichter sind Geräte der Starkstromtechnik, die die Umformung einer Stromart in eine andere bewerkstelligen, ohne den Umweg der Erregung mechanischer Energie als Zwischenenergieform zu beschreiten. Als Stromarten sind dabei zu unterscheiden der Gleichstrom, der Wechselstrom (einphasiger Wechselstrom) und der Drehstrom (dreiphasiger Wechselstrom) beliebiger Frequenz. Sie sind den umlaufenden elektrischen Maschinen im verschiedener Beziehung überlegen; sie sind anspruchsvoller in ihrer Aufstellung und Wartung, haben meist einen besseren Wirkungsgrad und sind mit verhältnismäßig geringem Aufwand vielseitig und praktisch trägeheitslos steuer- und regelbar.

Die Umformung einer Stromart in die andre geht immer so vor sich, dass durch periodische Umschaltungen, die der Stromrichter vollführt, eine periodisch wechselnde Veränderung der Strombahnen zwischen dem einen und dem anderen Stromsystem stattfindet. Unter dem Sammelbegriff Stromrichter unterscheidet man Gleichrichter, Wechselrichter und Umrichter.

Gleichrichter sind Stromrichter, die Wechselstrom oder Drehstrom in Gleichstrom umwandeln, indem mittels des genannten Schaltmechanismus Stromelemente der Wechselstrom so passen ausgewählt und auf der Gleichstromseite zu Gleichstrom zusammengeführt werden.

Wechselrichter sind Stromrichter, die dem umgekehrten Zweck dienen. Bei ihnen wird mittels des Schaltmechanismus der Gleichstrom zeitlich aufgeteilt, und es werden die entstehenden Stromelemente in wechselnder Richtung des Wechselstroms zugeführt.

Berichter nennt nun endlich die Stromrichter für den allgemeinsten Verwendungszweck, einen Wechselstrom oder Drehstrom einer Frequenz in einen Wechselstrom oder Drehstrom der gleichen oder anderen Frequenz umzuformen. Eine der wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten ist die Umformung von Drehstrom von 50 Hertz in Einphasen-Wechselstrom von 16 2/3 Hertz. Auch hier geschieht im Grunde nichts anderes als ein Auswählen von passenden Stromelementen des einen Stromsystems und passender Zuleitung dieser Stromelemente an das andere Stromsystem.

Für die technische Durchführung der erforderlichen periodischen Schaltfunktion stehen mehrere Wege offen. In der Starkstrompraxis haben sich indessen nur drei Arten von Stromrichtern durchgesetzt, die mechanisch wirken: Kontaktumformer, die Trockenrichter, die, wie der Name schon sagt, nur die Glühlampenstromrichter; Strom des Stromrichters aufnehmen, und die Lichtbögen-Stromrichter. Unter den letzteren gibt es solche, die ^{in einem der} durch den elektrischen Lichtbogen in der freien Atmosphäre brennt und solche, bei denen ein Lichtbogen in einem Vakuumgefäß unterhalten wird. Von dieser zuerst genannten Art der Stromrichter soll im Folgenden ausschließlich die Rede sein. Man bezeichnet sie in ihrer technisch-physikalischen Kennzeichnung als Gaseentladungs- oder Dampfentladungs-Stromrichter, da es sich bei dem Lichtbogen dieser Geräte um eine Bogenentladung vom Quecksilberdampf in einem evakuierten Gefäß handelt. Dieses Vakuum selbst hat immer eine Kathode und eine oder mehrere Anoden, womit die Elektroden geziert sind, zwischen denen der Lichtbogen brennt.

Unter diesen Dampfentladungs-Stromrichtern gibt es wiederum zwei verschiedene Formen, die sich in der Ausbildung und ~~physikalischen~~ physikalischen Wirkung der Kathode unterscheiden. Bei der einen Art vom Stromrichter-

gefassen hat man als Kathode eine mit einer Heizdrähte auf rotglut erwärmte Oxydkathode, die dadurch befähigt ist, Elektronen zu emittieren. Außerdem befindet sich in dem Vakuumgefäß etwas Quecksilber, von dem ein Teil verdampft, so dass in ihrer Wechselwirkung mit den Elektronen aus der Kathode die Voraussetzungen für die Bildungsmöglichkeit eines Quecksilberdampf-Lichtbogens gegeben sind. Das Gleiche erreicht man durch eine Edegarfüllung des Gefäßes.

Auf der anderen Seite gibt es Stromrichtergefäß mit einer Kathode, die aus einem Behälter mit flüssigem Quecksilber besteht. Leitet man an dieser durch Herausziehen einer stromdurchflossenen Tauchelektrode einen kleinen Hilflichtbogen ein, so bildet sich auf der Quecksilberoberfläche ein Fleck hoher Temperatur aus, der einerseits Elektronen emittiert und andererseits die Ausgangsraten einer erheblichen Quecksilberdampfentwicklung ist. Mit der damit im Gefolge stehenden Zündung des Hauptlichtbogens zwischen Anode und Kathode stellt sich ein gewisser Gleichgewichtszustand in der Elektronen- und Dampfemission des Kathodenfleckes einerseits und der Erhaltung der den Lichtbogen bedingenden Voraussetzungen im Entladungsraum andererseits ein. Im diesem Raum bildet sich ein Plasma aus, das Elektronen, ionisierte Quecksilberteilchen und neutrale Quecksilberdampf enthält. Der weitgehend überschneidige Quecksilberdampf kondensiert dabei im dem Gefäßrändern und kehrt als flüssiges Quecksilber zur Kathode zurück.

Die erstgenannte Art der Gasentladungs-Stromrichter nennt man Gleichkathoden-, die zuletzt beschriebene Art Quecksilberkathoden-Stromrichter. Um diese soll es sich im Folgenden vorzugsweise handeln, da nachdem das Vakuumgefäß aus Silicium oder aus Eisen gefertigt ist, spricht man von Glas- oder von Eisen-Stromrichtern. Alle Stromrichter haben das

-4-

für ihren Betrieb entscheidende gemeinsame Merkmal, dass ein Stromfluss nur in der positiv gerichteten Stromrichtung von Anode zur Kathode möglich ist. Die Zündung und Unterhaltung des Lichtbogens setzt also voraus, dass die Anode positiv gegenüber der Kathode ist.

Aber auch bei positiver Anoden Spannung lässt sich der Zündzeitpunkt des Lichtbogens durch andere Einwirkung beeinflussen. Durch ein an eine passende Steuerspannung ungeschalteten Vor der Anode eingeschalteten und elektrisch wirkenden Strohgitter lässt sich die sonst eintretende Zündung des Lichtbogens aussetzen und auf einen späteren Zeitpunkt verschieben. Man nennt diese Beeinflussung die Gittersteuerung des Stromrichters. Sie gestattet bei Gleichrichtern eine begrenzte Gleichspannungsregelung und macht bei Wechselrichtern und Umrichtern ihren Betrieb durch passende Auswahl der aufeinanderfolgenden Zündungen der Lichtbogenstrecken überhaupt erst möglich.

Die Arbeitsweise eines Stromrichters ist somit gekennzeichnet durch die periodische Aufeinanderfolge der Brennzeit und Löschzeit der Lichtbogenstrecken, wobei man sich zu vergegenwärtigen hat, dass bei Gross-Stromrichtern beispielsweise 50mal in der Sekunde ein Lichtbogen mit einem Stromfluss von einigen hundert bis einige zehntausend Ampère gestündet wird und nach jeweiliger Löschung dieses Lichtbogens eine Sperrspannung zwischen Anode und Kathode von einigen tausend bis zu einigen zehntausend Volt eintritt.

In der Anfangszeit der heute fast vier Jahrzehnte umspannenden Entwicklung der Stromrichter ging man bei der Konstruktion der Geräte rein empirisch vor, und dieser Weg war bei den damals geforderten Beanspruchungen hinsichtlich Ströme und Spannungen auch gangbar, sofern der Materialaufwand keine entscheidende Rolle spielt. Dieser

-5-

empirische Standpunkt wurde von den Konstrukteuren etwa von 1910 bis 1930 in einer Mateschdenheit behauptet. Die Erfahrung hat ihnen Recht gegeben, obwohl es sich um Gleichrichter-Einheiten für Gleichspannungen bis etwa 1000 V und Gleichströme bis etwa 3000 A handelte. Die 1927 aufgestellten Gleichrichter für die Berliner Stadt- und Ringbahn die heute noch passen, so in Betrieb sind, sind ein Zeugnis dafür. Aber als man von den sein seit fast ausschließlich üblichen Gleichrichtereinheiten mit 6 Anoden zu grösseren mit 12 Anoden oder sogar mit 24 Anoden überging und sich an Gleichrichter markten je Einheit vom 6000 A und darüber heranzwagte, traten Schwierigkeiten in der Beherrschung der Vorgänge im Entladungsgefece ein, zu deren Überwindung die bisherigen Erfahrungen nicht mehr ausreichten. Typische Fälle dieser Krisenzeit des Gleichrichterbauens sind die gässliche Zurücknahme der Projektierung von Gleichrichtereinheiten für Gleichströme bis 20000 A und die Rückdatierung einer für 16000 A projektierten Gleichrichtereinheit auf 8000 A Gleichstrom. Technische Schwierigkeiten stellten sich bei Übergang zu höheren Gleichspannungen von einigen tausend oder einigen zehntausend V lt ein und das Bild verkomplizierte sich weiter als gleichfalls in den Jahren um 1930 die Gittersteuerung der Gleichrichter Wirklichkeit wurde.

In diesen Jahren begann von anderer Seite her eine tiefgehende Erforschung der Physik der Gasentladungen, und es schien, als könnten und müssten die hier gewonnenen Erkenntnisse eine Bereicherung des Erfahrungsmaterials der Gleichrichterkonstruktion ergeben. Tatsächlich ist von zahlreichen Physikern und Ingenieuren im Laufe der Jahre eine erstaunliche Forschungsumfleit auf diesem Gebiet geleistet worden, die es nicht nur ermöglichte, Stromrichtergerüste beträchtlicher und mit geringeres und besser ausgenutztem Materialaufwand zu bauen, sondern

-6-

auch die höheren Spannungsbeanspruchungen zu befürchten. Aber trotzdem bereitete es grosse, bei einigen Firmen beinahe unabwendliche Schwierigkeiten, den reifen Erkenntnissen der Gasphysik bei der Konstruktion der Stromrichtergräuse ihre Berechtigung zu verschaffen. Es ist bemerkenswert, dass dies nicht auf unverhüllt praktische Schwierigkeiten zurückzuführen war, sondern mehr auf der geradezu eifersüchtigen Weigerung der Gliecherchekonstrukteure, den imzwischen gewonnenem fortschrittlichen Standpunkt der Betrachtungsweise der Probleme anzuerkennen.

Zu denjenigen, die die Notwendigkeit dieses Einbruchs der technischen Physik in die Konstruktion der Stromrichtergräuse als ihre Aufgabe eingesehen haben, und die auch die sehr umfangig bedingten elektrotechnischen Probleme eingehend studiert haben, zählen die durch diese Schrift verfassten Mitarbeiter dieses Gebietes.

Bevor auf die konstruktiven Merkmale der Stromrichter und die zu diesen gehörenden elektrotechnischen Einrichtungen näher eingegangen wird, soll im Folgenden einige über die Anwendungsbiete der Stromrichteranlagen gesagt werden.

2. Anwendungsbiete der Stromrichter.

Die Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie erfolgt heute in Deutschland bekanntlich ganz überwiegend in Form des Drehstroms mit einer Frequenz von 50 Hertz. Nur in Ausnahmefällen werden noch Stromerzeuger für Gleichstrom oder einphasigen Wechselstrom von 16 2/3 Hertz, angetrieben durch Kraftmaschinen großer Leistung, Wasserturbinen oder Dampfturbinen, verwendet. Auch die Verbäucher elektrischer Energie werden zum großen Teil aus Drehstromnetzen versorgt. Die folge-

-7-

meinen Netze unserer Städte und Landbezirke sind in der Zypa Regel Drehstromnetze von 380 kV oder 220 V verketteter Spannung. Überall dort, wo aus historischen Gründen noch Gleichstromnetze vorhanden sind, ist man bestrebt, auf Drehstrom überzugehen. Moderne Fabriknetze sind Drehstromnetze von 380 V oder 500 V verketteter Spannung. Verbraucher größerer Leistung werden meist unmittelbar an das 6 kV- oder 10 kV-Netz angeschlossen.

Dagegenüber gibt es aber eine Reihe von Verbrauchern, welche entweder zu ihrem Betrieb unbedingt auf Gleichstrom angewiesen sind oder für die eine Speisung mittels Gleichstrom so große Vorteile mit sich bringt, daß man davon nicht abgehen will. Diese Verbraucher, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen, wurden früher über rotierende Umformer aus den allgemeinen Verteilungsnetzen gespeist. In den letzten zwanzig Jahren sind an die Stelle solcher Umformeranlagen mehr und mehr Stromrichteranlagen getreten und heute werden rotierende Umformer kaum noch aufgestellt. Praktisch alle modernen Gleichstromanlagen größerer Leistung sind Quicksilberdampf-Stromrichteranlagen mit Eisengefüßen. Die Hauptanwendungsbereiche des Quicksilberdampf-Stromrichters gliedern sich in der folgenden These:

1. Elektrische Bahnen.

Die Speisung von elektrischen Bahnen im Orts-, Nah- und Fernverkehr und von Industrie- und Grubenbahnen geschieht mit Ausnahme der mitteleuropäischen Fernbahnen mit Einphasen-Gleichstrom 16 2/3 Hertz heute fast ausschließlich mit Gleichstrom. Wo noch andere Systeme in Betrieb sind, wie z.B. bei den Hamburger Vorortbahnen, ist man bestrebt, auf Gleichstrom überzugehen. Als Stromumformer für Gleich-

-8-

-8-

strombahnen kommen heute nur noch Stromrichter in Frage; die noch vorhandene rotierenden Umformer sind am Aussterben. Die in Betracht kennenden normalen Betriebsspannungen sind

550 V Gleichspannung für Straßenbahnen,

750, 1100 oder 1500 V für Stadt- und Vorortbahnen mit eigenem Bahnkörper sowie für Industrie- und Grubenbahnen und

3000 V für Fernbahnen.

Die installierten Leistungen je Stromrichtereinheit liegen zwischen 150 kW für kleine Straßenbahnanlagen und 3000 kW für die Schnellbahnen unserer Großstädte und für Fernbahnen. Die Zahl der in Deutschland zur Zeit in Betrieb befindlichen Stromrichter ist schwer abschätzbar, allein in Berlin beträgt sie weit über hundert.

2. Industrielle Antriebe.

Industrielle Antriebe hoher Leistungen, für die ein großer Drehzahl-Regelbereich verlangt wird, sind mit Gleichstrommotoren ausgerüstet. Solche Antriebe werden anstelle der früher üblichen Leonard-Umformer heute in der Regel durch gesteuerte Stromrichter gespeist. Nur in besonders gelagerten Ausnahmefällen, wie z.B. bei Fördermaschinen-Antrieben, steht der Leonard-Umformer noch erfolgreich im Wettbewerb mit der sog. Umkehr-Stromrichteranlage, die in diesem Falle besonders kompliziert ist, da sie für stopfreien Übergang von Vorwärtsbetrieb auf Bremsen und Rückwärtsbetrieb bei jeder Drehzahl eingerichtet sein muss.

Wahr
Bei Netzwerksantrieben, besonders für durchlaufende Netzwerke, bei Antrieben größerer Papiermaschinen und für ähnliche Aufgaben wird

-9-

-9-

man unbedingt den Stromrichterantrieb den Vorzug geben, der bei gleicher Betriebssicherheit einfacher und billiger als ein Umformer ist und der dann trägeheitslos geregelt werden kann.

Die Gleichspannungen solcher Antriebe liegen zwischen 500 und 1200 V, größere Gleichstromnetze mit mehr als 1200 V Kollektorspannung sucht man zu vermeiden. Die vorkommenden Leistungen je Stromrichtereinheit bewegen sich zwischen einigen hundert kW und 3000 kW und mehr. Naturgemäß sind Antriebe dieser Art noch nicht allzu häufig, doch waren in Deutschland bei Kriegsbeginn schon eine Reihe von ^{Wahl} Kraftwerken, einige Papiermaschinen und die Gebläsemotoren aller großen Windkanäle, mit Ausnahme desjenigen in Adlershof, mit Stromrichterantrieben ausgerüstet; Das bemerkenswerteste Beispiel war die 1937 in Betrieb genommene Breitbandstraße in Dinslaken, deren beide Endgerüste mit Stromrichterantrieben arbeiteten. Es waren dafür 6 Stromrichtereinheiten für 800 V bei 3000 A Dauerlast aufgestellt.

In Chemische Industrie.

Die chemische Industrie benötigt für verschiedene chemische Umsetzungen in erheblichem Umfang Gleichstrom; sie erzeugt diesen fast ausschließlich mittels Stromrichteranlagen. Vor allem anderen ist hier das große Gebiet der Elektrolyse zu nennen. Durch elektrolytische Zersetzung wässriger Lösungen werden in der Hauptsache erzeugt

Wasserstoff,
Chlor und Natronlauge
Zink und
Elektrolytkörper.

Der Energieaufwand für die Kupfergewinnung beträgt etwa 130 kWh je Tonne.

-10-

-10-

Durch die sogenannte Schmelzflusselfektolyse, bei welcher eine geschmolzene Verbindung des betreffenden Metallos hergestellt wird, werden hauptsächlich gewonnen

Aluminium mit einem Aufwand von 21 kWh/kg

Magnesium " " " " 20 kWh/kg

Metalls " " " " 14 kWh/kg und

Silizium. " " " " ?

Die Stromrichteranlagen für Elektrolyse sind leistungsmässig die grössten ihrer Art. Beispielsweise sind die Betriebswerte eines Röder-Systems für Aluminium heute 900 V und 30 000 A. Dabei wird die Spannung durch Reihenschaltung einer grossen Anzahl von Gelenk deswegen so hoch gehalten, damit man mit möglichst gutem Wirkungsgrad erreicht. Bei Anlagen mit Spannungen unter 500 V sind die Verluste so hoch, dass sie vorteilhafter mit Kontaktumformern betrieben werden. In Deutschland waren 1959 insgesamt für Elektrolyse-Anlagen aller Art Stromrichter mit einer Gesamtleistung von etwa 1 000 000 kW in Betrieb.

Als weiteres Anwendungsbereich für den gesteuerten Stromrichter in der chemischen Industrie kam im letzten Jahrzehnt der Öl-lichtbogen-Lichtbogenofen zur Acetylenherstellung aus Abgasen der Hydrierwerke oder aus Erdgas hinzu. Derartige Lichtbogenöfen arbeiten mit einer Öl-Lichtspannung von 7000 bis 10000 V und einem Strom von etwa 10 000 A. Die einzige Lichtbogenofen-Anlage in Deutschland in Zellé hatte 14 solcher Einheiten im Betrieb. Weitere Anlagen waren im Bau.

4. Sonderstromversorgung.

Ein weiteres fast ausschließlich dem Stromrichter vorbehaltenes Gebiet ist die Erzeugung der Anodenspannung für die Endstufen der Grosssender. Es handelt sich hier um Spannungen von 10 000 V und mehr und Leistungen von 200 bis 2000 kW. Ein anderes Anwendungsbereich bilden

-11-

2. Industrielle Sender für Hochfrequenzstrahlung.

3. Wechselrichter für Induktionsöfen.

Bisher ist bei der Aufzählung von Anwendungsbereichen der Stromrichter nur von ungesteuerten oder gesteuerten Gleichrichtern die Rede gewesen. Wir gehen jetzt auf die Besprechung der Anwendung des Stromrichters als Wechselrichter oder Umrichter über.

Ein interessantes Anwendungsbereich des Stromrichters als Wechselrichter ist der Betrieb von Induktionsöfen zur Herstellung von Elektrostahl, bei denen Frequenzen des Stromes zwischen 300 und 2000 Hertz im Betracht kommen. Eine Versuchsanlage dieser Art wurde 1932 auf der Industrie-Anstaltung in Bochum errichtet.

4. Umrichter für Hochgeschwindigkeitszüge.

Ein eindrucksvolles Bild von der Vielseitigkeit der Anwendung von gesteuerten Stromrichtern geben die sog. Umrichter zur Erzeugung von Einphasen-Gleichstrom $16\frac{2}{3}$ Hertz für den Betrieb der auf diese Stromart abgestimmten Fernbahnen, wobei die Erzeugung dieses Stromes unmittelbar aus dem Drehstrom 50 Hertz der Landesversorgung vor sich geht. Anlagen dieser Art mit einer Leistung von 1000 bis 3000 kW sind im Reichsbahnhof für die Südbahnstrecke, in Pforzheim und in Nürnberg errichtet worden (13).

5. Hochfrequenz-Segmenteinspeisung-Gleichstromübergänge.

Ein weiteres Anwendungsbereich der gesteuerten Stromrichter, das, wie viele andere ber its seit über 15 Jahren als Zielsetzung vorschwebte, ist die Einführung von zwei Landesnetzen mit Drehstrom 50 Hertz über eine Gleichstromleistung. Das Schwerpunkt liegt dabei in der Verwendungsmöglichkeit von Kabeln. Beispielsweise lag ein Gedanke zu grunde, für die Energiedurchleitung aus Skandinavien nach Deutschland

-12-

-1-

ein Gleichstromkabel durch die Ostsee zu legen, das über eine Gleichrichteranlage an das nordische und über eine Wechselrichteranlage an das deutsche Energienetz angeschlossen ist. Damit ist eines der interessantesten Probleme angeschnitten, das der Hochspannungs-Gleichstromübertragung, der Fortzgang grosser Energie über Entfernung von der Gründung 1000 km. An seiner technischen Lösung wurde in Deutschland bis Kriegsende intensiv gearbeitet. An diese Arbeiten ist heute verschämtlich angeknüpft worden und es ist dadurch der seit Jahren immer neu aufliebende Wettbewerb zwischen der 400 kV-Drehstromübertragung und der Gleichstromübertragung gleicher Spannungsordnung wieder in den Vordergrund getreten.
Es überschreite aber den Zweck und den Rahmen dieser Schrift bei weitem, auf dieses Problem ausführlicher einzugehen.

3. Stromrichtermotoren

Es gibt nun noch weitere Anwendungen des gesteuerten Stromrichters, die aus dem Rahmen der bisher aufgeführten Stromumwandlungen oder, wie man auch zweilen zu sagen pflegt, der Strom-Umwandlungen, völlig herausfallen. Bei ihnen werden die Lichtbogenstrecken eines Stromrichters nur noch zum Vollzug einer Schaltfunktion herangezogen. Ein bedenkliches Anwendungsbereich dieser Art ist der sog. Stromrichtermotor, ein Aggregat einer elektrischen Maschine und eines Stromrichters, bei wo dem Letzteren die Funktion des Kolktors eines Drehstrommotors übertragen wird. Mit einer solchen Anordnung ist es möglich, ausgehend vom einem Drehstromnetz normaler Frequenz, einen Motorantrieb mit statiger Drehzahlregelung zu schaffen.

Die sog. Synchrone Type des Stromrichtermotors besteht aus einem Synchronmotor, der über einen Umrichter von dem Drehstromnetz gespeist wird. Der Umrichter gestaltet, die netzfrequente Spannung in eine andere Wechselspannung umzuwandeln, deren Frequenz von Null an stetig

-13-

-13-

regelbar ist, wodurch es möglich ist, die Drehzahl des Motors stetig zu verändern.

Die sog. Asynchronotypen des Stromrichtermotors besteht aus einem Asynchronmotor, dessen Schlußleiter über einen Urichter dem Netz zugeführt wird. Der Urichter hat hierbei wie bei einer Drehzahlregelung mit Hintermaschine die Aufgabe, die schlußfrequente Spannung in eine netzfrequente Spannung umzuwandeln und somit je nach der Größe und Richtung der über dem Urichter übertragenden Leistung eine stetige Drehzahlregelung im Überynchronen und untersynchronen Bereich bis herab auf Null zu ermöglichen.

Die Entwicklung der Stromrichtersteller wurde sowohl von den deutschen Firmen AEG und SW, als auch in Amerika, in Russland und in der Schweiz aufgegriffen. Die AG lieferte an die Ganti-Werke in Hannover einen Synchron-Stromrichtermotor von etwa 150 kW für den Antrieb eines Kalanders. In Russland wurde 1948 ein 600 kW-Motor für einen Walzwerkmaschinenantrieb in Betrieb genommen. Im übrigen steht die Entwicklung des Stromrichtermotors noch ähnlich in den Anfängen. Indessen verändert sich seit den Fortschritten hinsichtlich besserer Ausnutzung des Motors bei Verwendung von Schaltungen, die statische mehrpolige Stromrichter erlauben eine entsprechende Anzahl von Rinnenden-Gefüßen erforderlich. Dieser Umstand kommt der heute erfolgten Entwicklungstendenz, die, wie nachher noch gesagt werden wird, den Rinnenden-Gefüßen den Vorzug gibt, unmittelbar entgegen.

2. Schweißmaschinen:

Als reines periodisch wirkendes Schaltorgan wird der gesteuerte Stromrichter als Kurzschlußschalter für Schweißmaschinen verwendet. Durch Änderung der Gitterstromerregung lässt sich leicht jedes gewünschte Schweißprogramm erreichen. Zur Erfüllung des gleichen Zweckes sind

-14-

auch sog. Ignitron-Gefäße, Einzoden-Stromrichtergeräte, mit einem Röhrenstift an der Kathode anstelle des Steuergleiters an der Anode, verwendet werden. Dieser, aus einem besonderen Material gefertigte Röhrenstift, gestattet eine augenblickliche Herauslösung eines Lichtbogens ohne vorheriges Bestehen einer Kathodenfleckbildung.

10. Schalter.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Stromrichters als trägeheitsloses Schalter sind bisher erst an kleinen Versuchsmustern erprobt. So kann man z.B. einanodige Gefäße, die paarweise antiparallel geschaltet sind, zur automatischen stopffreien Synchronisierung von Drehstrommaschinen verwenden, wobei die Lichtbogenentzündung nach Umstellung der Stromverbindung durch einen Trennschalter überbrückt und entlastet werden.

Auch die Unterschaltung von hochgespanntem Gleichstrom, die bekanntlich mit dem üblichen Leistungsschalter nicht mehr möglich ist, kann mit einem Stromrichter in Verbindung mit einem Kondensator bewerkstelligt werden. Eine solche Einrichtung, die man als Kondensator-Schalter bezeichnet, erlangt vielleicht im Zusammenhang mit der Hochspannungs-Gleichstromübertragung noch einmal grösere Bedeutung.

11. Batterieladung.

Wenn wir nach Schilderung der außerordentlich vielseitigen Verwendungsmöglichkeit der gesteuerten Stromrichter zu unserem Ausgangspunkt, dem Gleichrichter zurück, so haben wir die Pflicht, ein Anwendungsbereich zu erwähnen, das zugleich das historisch älteste ist, nämlich die Batterieladung. Allerdings ist die Heranziehung vom Quecksilberkathoden-Stromrichter heute nur noch den grossen Leistungen bei entsprechend hoher Seriesspannung vorbehalten, da das

Gebiet kleiner und mittlerer Leistungen, vor allem bei niedriger Batteriespannung, vorwiegend von den Gleichrichtern und Glühkathoden-Gleichrichtern sowie neuerdings aber und mehr von den Kontaktanformern beherrscht wird.

Die Bauarten der Stromrichter-Gefäße,

Es soll nun auf die Ausführung der Stromrichter-Gefäße und auf die physikalisch-technischen Gesichtspunkte für ihre Konstruktion näher eingegangen werden. Dabei soll ausschließlich von Quecksilbordampf-Stromrichtern mit Quecksilberkathode die Rede sein.

Die Arbeitsweise eines Stromrichters ist, wie bereits gesagt worden ist, gekennzeichnet durch die periodische Aufeinanderfolge von der Brennzeit einer Lichtbogenstrecke und der durch anschließenden Sperrzeit. Die Beanspruchung des Stromrichters ist daher festgelegt durch die Strombelastung während der Brennzeit und die Sperrspannungsbeanspruchung des Entladungszweigs während der Sperrzeit. Der brennende Lichtbogen selbst ist gekennzeichnet durch die sog. Brennspannung, die je nach Größe und Art des Stromrichters etwa 20 bis 35 V beträgt. Die hierdurch bedingten Verhältnisse im Gefäß bestimmen dessen Temperaturverhältnisse, die mit den günstigsten physikalischen Bedingungen der Entladungstrecke im Einklang stehen müssen, bzw. sie besitzen die durch Kühlung abzuführende Wärmeenge. Die Sperrspannungsbedingungen nach Verlöschen des Lichtbogens dürfen andererseits zu keiner sog. Rückbildung führen, womit man die Störung meint, die eintritt, wenn vorübergehend eine Anode selbst zum Anfangspunkt eines Lichtbogens wird. Endlich setzt die einwandfreie Steuereigenschaft des Stromrichters voraus, dass jede Entladungstrecke nach Verlöschen des Lichtbogens auch und genugend vollständig entionisiert wird,

da sonst die Gitterstromung der der erloschenen Anode nachfolgenden Anode gefährdet ist.

Wie bei anderen Maschinen und Geräten wird auch bei einem Stromrichter die Bauform bestimmt durch die auch vielfach voneinander abweichen den Forderungen nach Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Die in einer Anladezeit t entstehenden Wattverluste errechnen sich aus dem Produkt von Brennspannung zwischen Anode und Kathode und dem fließenden Strom, wobei eigentlich noch genauer gesagt werden müste, welche Mittelwerte dieser Größen gemeint sind. Bei richtig konstruierten Stromrichtern mittlerer Größe ist die Brennspannung stetig unabhängig von der Belastung und beträgt durchschnittlich 20-25 V. Davon entfallen als Spannungsgefälle an der Kathode etwa 8-10 V und als Spannung an der Anode 4-5 V, während der Rest der Brennspannungsabfall in der eigentlichen Lichtbogengähle verbraucht wird. Die weitgehende Unabhängigkeit der Brennspannung von der Gleichstromstärke schließt in sich, dass die Gefahr verluste unabhängig von der Betriebsspannung sind, so dass der Wirkungsgrad umso besser wird, je höher die Betriebsspannung ist.

Die an den einzelnen Bauteilen anfallenden Verluste des Stromrichtergerüsts müssen nun bei Temperaturen abgeführt werden, die einen einwandfreien Betrieb gewährleisten. Die an der Kathode entstehende Verlustleistung ändert sich in einer Temperatursteigerung sowie einer dem Leistungstrom entsprechenden Verdampfung des Kathodenquecksilbers. Da sich beides auf die Höhe des Quecksilberdampfdruckes im Gefäß auswirkt, der für das betriebssichere Arbeiten des Stromrichters von ausschlaggebender Bedeutung ist, müssen von konstruktiver und betrieblicher Seite Vorschriften getroffen werden, um diesen Wert in bestimmten Grenzen zu halten. Das sind i. e. Temperaturregelung

an der Kathode und die Bereitstellung von ausreichenden Kühlflächen für die Kondensatoren des Quecksilberdampfes.

Die Anode als der eigentliche Sitz der Ventilwirkung des Stromrichters geschieht bei während der Brennzeit ein sogenanntfreien Zünden und Brennen des Lichtbogens und bei Beginn der jeweiligen Sperrzeit ein möglichst rasches Ionenisieren und Wiederfreiwerden der Entladungsstrecke von restlichen Ladungsträgern gewährleisten. Dies bedingt, dass die Anode einmal vor einem direkten Einstrom des Quecksilberdampfes geschützt werden muss, was im allgemeinen durch ein zur Spitze des Anodenkopfes sogen. Anodenarme besetzt wird. Außerdem sind besondere Ionenisierungsflächen vorzusehen, sogen. Abregogitter und Steuergitter, die induzieren den freien Durchtritt des Lichtbogens während seiner Brennzeit nicht unzweckmäßig behindern dürfen.

Die an den Anodenkopf fallende Verlustwärme wird nur zu einem ganz geringen Teil durch Wärmeleitung über die Anodenbolzen an die daran anschließenden Kühlkörper weitergegeben. Der größte Teil wird bei den hier berechneten Temperaturen von 600-605 °C an die Umgebung abgestrahlt. Im Betracht dieser verhältnismäßig hohen thermischen Beanspruchung der Anode muss als Material für die Anodenköpfe Kusserat reiner Elektrografit verwendet werden.

Für die Bauart des Stromrichters,efmass ist vor allem die Temperaturhaltung der den Quecksilberdampfdruck bestimmenden Flächen maßgebend. Je nach der spezifischen Belastung der Kondensationsflächen erfolgt die Wärmeabfuhr durch Luft- oder Flüssigkeitskühlung.

Bei kleinen und mittleren Leistungen kommt man z.B. mit Luftkühlung z.B. Ein typisches Beispiel dafür sind die Glasmgleichrichter, die bei sechsmäßiger Bauart für Gleichstromstärken bis etwa 400 A gebaut werden. Das Feld größerer Gleichstromstärken wird durch die Eisengleichrichter beherrscht. Ihre Bauformen sind bei den verschiede-

-18-

nen Herstellerfirmen recht unterschiedlich. Was viele Eisengleichrichter mit dem Glasgleichrichter gemeinsam haben, ist der oberhalb der Kathode angeordnete zentrale Kühldom, um dessen unteren Teil sich die Anoden herumgruppieren. Die Anoden befinden sich dabei entweder in besonderen Armen, die dem Luftstrom eines Lüfters ausgesetzt sind, oder sie sind in einen besonderen zylindrischen Kesseluntergebracht, der gegebenenfalls den Unterbau für den obengenannten Kühldom bildet.

Seiche luftgekühlte Stromrichtergefässe werden bei Bestückung mit 6 Anoden für Gleichstromstärken bis 1000-1500 A ausgelegt, wobei Gleichspannungen bis 600-800 V in Betracht kommen. Bei höheren Gleichspannungen ist die Gleichstromstärke heruntersuzetzen. Zur Verwendung als Gleichgleichrichter sind luftgekühlte Mehranodengleichrichter für Gleichspannungen bis 20000 V ausgeführt worden.

Bei Gleichstromstärken oberhalb 1000 A sind Eisengleichrichter im allgemeinen wassergekühlt, wobei die Kathode und die Gefäßwand in erster Linie wassergekühlt sind, während die Anodenbolzen bei den grösseren Gefäßtypen für Gleichströme oberhalb 3000 A wassergekühlt sind. Bestückt man mit diesen Gefässen bei Gleichströmen

bis etwa 1000 A mit 6 Anoden
" " 4000 A " 12 "
" " 6000 A " 18 " und
" " 8000 A " 24 ".

Es ist klar, daß bei derartigen Grossgleichrichtern mit ~~immerhin~~ wachsender Anodenzahl der Gefäßdurchmesser sehr groß werden muß. Bei einem 8000 A-Gleichrichter beträgt er etwa 3 m, womit sich eine Lichtbogenlänge von beinahe 2 m ergibt. Bei einer solchen Länge der Entladungstrecke sind jedoch Brennspannungen von 40 V und mehr zu erwarten. Aus diesem Grunde ist man vor etwa 10 Jahren dazu übergegangen, Einanoden-Stromrichtergefässe zu bauen, ^{also} je Anode ein eige-

-19-

-19-

nes entsprechend kleinerem wassergekühlten Gefäßes mit eigener Kathode vorzusehen. Damitkehrte die Entwicklung scheinbar wieder zu jenen Bauformen zurück, die bei dem Entwurf der ersten Riesengleichrichter vor fast 40 Jahren bestanden haben, denn auch die damaligen Gleichrichter waren einanodig ausgeführt. Es ist jedoch zu bedenken, daß die tatsächliche konstruktive Ausbildung nach den heute vorliegenden Erkenntnissen der Gasentladungsphysik eine vielfältig andere ist, als die damals durchgeführte.

Die Aufrechterhaltung des Vakuums eines Riesengleichrichters erforderte bisher im allgemeinen und bei den Hochstromtypen auch heute grundsätzlich eine ständig laufende Vakuum-Pumpenentwicklung. Der Hauptgrund für diese Notwendigkeit ist die Schwierigkeit, die Dichtungen für die isolierten Anodenführungen genügend temperaturfest auszubilden. Seit etwa 10 Jahren sind indessen auf diesem Gebiet wesentliche Fortschritte gemacht worden. Es ist gelungen, die entscheidenden Fragen der Gefäßdichtigkeit zu klären, völlig dichte Schweißnähte herzustellen, und es ist gelungen, temperaturfeste und hochvakuumdichte Elektrodeneinführungen herzustellen.

So ist man schon vor einer Reihe von Jahren gasu. übergegangen, luftgekühlte Mehranodengefäße für Gleichstromstufen bis 1500 A pumpenlos auszuführen. Es sind bei diesen Lebensdauern von 10-bis 20000 Brennstunden erreicht worden. Ferner legte man bei der Entwicklung der Riesenanodengefäße im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten, wo üblicherweise 6 Gefäße an eine gemeinsame Vakuumpumpe angeschlossen wurden, in Deutschland von Anfang an Wert darauf, diese Gefäße pumpenlos auszuführen.

Bevor wir auf die Beschreibung der für solche Stromrichtergefäße entwickelten Elektrodendurchführungen eingehen, müssen wir indessen

-20-

-20-

einen Punkt des Gefäßbaues erwähnen, dessen Kenntnis zur Beurteilung der Durchführungs dichtungen unerlässlich ist. Stromrichtergerüste sind nach ihrer Fertigung und Evakuierung nicht unmittelbar betriebsfähig, da an den innenseitigen Gefäßrändern Gasereste eingeschlossen sind, die mit der Gefäßauwärzung austreten und das Vakuum verschlechtern. Aus diesem Grunde führt man mit dem Gefäß einen Prozeß durch, den man Formieren oder Ausheizen nennt und der darin besteht, durch langsam gesteigerten Strombetrieb bei niedriger Gleichspannung und bei ständig laufender Vakuumpumpe eine Gefäßauwärzung und Erwärmung der übrigen Innenteile zum Zwecke der Austreibung der Gasereste durchzuführen. Für ganz gewöhnlich geht diesen Prozeß eine Sonderbehandlung der Graphitanoden und andererteile voraus. Dieser Ausheisprozeß ist indessen begrenzt durch die Temperaturfestigkeit der in dieser Beziehung entwickelten Teile des Gefäßes. Und diese Teile sind die Durchführungs dichtungen.

Die älteren Gummidichtungen, die bei Groß-Stromrichtern heute noch vielfach angewendet werden, vertragen eine Temperaturbeanspruchung von wenig über 70° C. Es war daher ein Fortschritt, als es gelang, Durchführungen mit Keramik als notierendes Dichtungsmaterial zu entwickeln, bei denen eine Wachlochhaut auf der Keramik die vakuumdichte Verbindung mit dem Gefäßeisen herstellte. Solche Dichtungen vertragen bereits über 100° C. Einen außerordentlichen Fortschritt erzielte man mit Silber-Hartlötzungen zwischen Keramik-Keramik und Eisen. Die Temperaturfestigkeit dieser Dichtungen erreichte 400-500° C, allerdings wird sie bisher nur für äußere Keramikdurchmesser von etwa 60 mm ausgeführt werden. Eine andere Elektrodendurchführung, die sich für pumpenlose Gefäße sehr bewährt hat, ist auf einer Glas-Eisen-Verschmelzung aufgebaut. Bei ihr ist ein emailliertüberzogener Durch-

-21-

-21-

führungsbohlen bzw. ein Durchführungsrohr aus Chromstahl über einen Glasprefen gleichfalls emaillierten Eisenrohr verschmelzen. Die Temperaturgrenze dieser Dichtungen liegt z.Zt bei 300-350° C, bei normalem Gleichstrombetrieb begrenzt man die Beanspruchung mit Rücksicht auf Elektrolyseerscheinungen, die unter der Spannungswirkung bei höheren Temperaturen im Glas auftreten würden, auf 200 bis 250° C.

Eine der größten Schwierigkeiten, die den pumpenlosen Betrieb wassergekühlter Eisengefäße gegenüberstanden, war die Wasserstoffdiffusion bei der das Vakuum im Gefäß infolge Diffusion von atomarem Wasserstoff aus dem Kühlwasser ständig verschlechtert wird. Hier gilt es, sowohl die Kühlwasserveite des Vakuumgefäßes mit einem ausreichenden Schutz zu versehen, als auch das Kühlwasser chemisch derart zu behandeln, daß die als Voraussetzung für die Wasserstoffdiffusion erkannte Korrosion vollkommen vermieden wird.

Was die Fertigung der Stromrichtergefäß anlangt, können für die außerhalb der Vakuumhaut liegenden Bauteile die in der Elektrotechnik allgemein üblichen Materialien verwendet werden. Ganzlich anders gilt indessen für die Fertigung der Innenteile. Hier kommt es auf die richtige Auswahl der Materialien, auf ihre Oberflächenbehandlung, ihre genaue physikalische und chemische Überprüfung entscheidend an. Ferner sind peinlich durchgeführte Waschungen mit Waschmitteln, wie Tetrachlorkohlenstoff oder Trichlorathylen und Benzin sowie Alkohol erforderlich, wobei lösungsmittelfeste Bürsten und saubere fettfreie Tücher gebraucht werden müssen.

Besonders hohe Ansprüche sind an die Güte von Eisenblechen, sog. Tiefziehbleche, zu stellen. Diese müssen aus Elektrostahl herge-

-22-

-22-

stellt mein und einen geringen Kphlenstoffgehalt aufweisen. Die unvermeidlichen restlichen Verunreinigungen müssen unterhalb der äußerst erreichbaren Grenzen liegen. Ferner muß ihre Oberfläche fehlerfrei sein, die Bleche dürfen auch keine sog. Doppelungen aufweisen. Alle weiteren Einbauteile aus Eisen müssen gleichfalls aus Elektrostahl gleicher Reinheit, in einigen Fällen sogar aus Armcoeisen gefertigt werden. Am Rohrmaterial dürfen nur vakuundichte, nahtlos gezogene Rohre verwendet werden.

Das für die Kathode erforderliche Quecksilber, das in einer Menge von etwa 20 g je 1 A Gleichstrom benötigt wird, muß dennoch rein sein, was in besonderen Reinigungs- und Destillier-anlagen erreicht wird.

Graphit gilt die Anodengitter, Blenden und anderen Einbauteile muß im reinster Qualität verwendet werden, es muß sachefrei sein und darf Beimengungen, wie Calcium- und Siliciumverbindungen, nur spurenweise enthalten.

Schließlich sei noch erwähnt, daß sich zur Vermeidung von Überspannungen bei Ersteinschaltungen des halben Stromrichtergefäßes eine Argonfüllung mit einem Partialdruck von etwa 10mTorr bewährt hat.

Aber wir wollen uns bei der Besprechung der Bauformen der Stromrichtergefäß nicht in Einzelheiten verlieren. Einige Typen pumpenloser Stromrichter in sechsanodiger und einanodiger Ausführung, die den derzeitigen Anforderungen zunächst entsprechen dürften, sind in den am Schluß dieses Berichtes vorgeschlagenen Fabrikationsprojekt aufgeführt. Vorerst ist es notwendig, Einiges über die weiteren Bestandteile einer Stromrichteranlage mitzuteilen.

Damit wenden wir uns der Elektrotechnik der Stromrichter zu; der wichtigste Bestandteil jeder Anlage in dieser Hinsicht ist der Stromrichter-Transformator.

-23-

4. Stromrichter-Transformatoren.

Ein Transformator hat in elektrischen Anlagen im allgemeinen die Aufgabe der Spannungsumsetzung, weshalb man ihn auch schlechthin als Umspanner bezeichnet. Diese Funktion ist bei Stromrichteranlagen ebenfalls zu erfüllen, da das Stromrichtergerüst ja nur Schaltfunktionen vollführt, also nichts anderes als mehr oder weniger komplizierte galvanische Verbindungen zwischen dem einen Netz und dem anderen Netz herstellt, bei denen das Spannungsverhältnis ^{der Transf.} unverändert bleibt.

Aber die durch den Stromrichter aus dem einen Stromsystem herausgeschnittenen Stromelemente müssen auf die Leitungsbestandteile des anderen Stromsystems richtig und zweckmäßig verteilt werden. Diese Funktion ist nun ebenfalls dem Transformator überantwortet. Sie ist im allgemeinen noch mit einer sog. ^{Fluss}transformation verknüpft. Das bedeutet, daß z.B. bei einem Gleichrichter, der Drehstrom in Gleichstrom umwandeln soll, der zugehörige Transformator neben der Umspannung auf seiner Sekundärseite ein höherphasiges Wechselstromnetz, etwa ein sechsphasiges, zwölffasiges oder noch höherphasiges System, herstellt. Erst dieses System wirkt mit den Ventilstrecken des entsprechenden vielanzögigen Gleichrichtergerüstes oder des Systems von ebensovielen Einanodengefäßen zusammen und die hieraus entstehenden Stromimpulse setzen sich erst aus dem Gleichstrom zusammen.

Da man bemüht ist, einen möglichst geglückten Gleichstrom zu erhalten, was durch die Reaktanzen des Gleichstromverbrauchers oder durch durch eine besondere sog. Gleichstromdrossel begünstigt wird, muß man bei den Einstellungsverhältnissen eines Transformators aber

-25-

in Kauf nehmen, daß seine primären Wechselströme nicht mehr rein sinusförmig, sondern treppenförmig abgesteckt sind, wobei die Zahl dieser Treppenstufen von der Vervielfachung der sekundären Phasenzahl abhängt. Je höher diese Phasenzahl ist, desto feiner sind die Schaltprozesse des Stromrichtergerätes abgesteckt und desto mehr nähert man sich der Forderung nach einer möglichst überwellenfreien Gleichspannung bei gleichzeitig möglichst überwellenfreien Wechselströmen auf der Drehstromseite. Ähnliches gilt für Wechselrichter und Umrichter.

Ein Stromrichtertransformator vereinigt in sich die Funktion der Umspannung und der Phasentransformation. Für die schaltungsmäßige und konstruktive Entwicklung der Stromrichtertransformatoren sind indessen noch eine ganze Reihe weiterer Bedingungen zu erfüllen. Sie stehen zum Teil im Einklang miteinander, zum Teil widersprechen sie sich. Und dies ist der Grund für die Entwicklung einer außerordentlichen Fülle von Schaltungen, wobei die Möglichkeiten ihrer Weiterentwicklung noch nicht einmal abgeschlossen ist.

So soll z.B. bei einem Gleichrichter eine sog. Gleichspannungskennlinie über den ganzen Belastungsbereich möglichst gleichmäßig und flach verlaufen, der prozentuale Gleichspannungsabfall, der durch die Streureaktanzen des Transformatorens verursacht wird, soll also nur während der Kurzschlußspannung des Transformatorens wiederum nicht zu niedrig sein soll. Diese sich anscheinend widersprechenden Forderungen lassen sich nur durch Kunstschaltungen erfüllen, die auf eine Verlängerung der Anodenbrenndauer bzw. Verteilung des Gleichstroms auf mehrere gleichzeitig brennende Anoden des Stromrichtergerätes absichten. Hierdurch lässt sich wiederum eine bessere Gefäßausnutzung, ein weiteres Anlaufen des jeweils verlaufenden

-26-

-26-

Anodenstromes erreichen. Eine weitere Forderung, die nicht leicht zu erfüllen ist, ist die Erzielung einer wirklichen mehrphasigen Symmetrie der Transformatorschaltung bei jeder Belastung, denn das mehrphasige Wicklungssystem muß aus einzelnen Teilwicklungen der drei Gitternetzketten des Transformators, die den drei Spannungsgrundvektoren entsprechen, aufgebaut werden, und es ist nicht leicht, bei solchen Anordnungen eine allseitige Symmetrie der Stromverhältnisse der Wicklungen zu erreichen.

Die ältere Entwicklung der Stromrichtergeräte führte, wie bereits gesagt worden ist, zur Schaffung von Mehranodengefäßen mit gemeinsamer Kathode für alle Lichtbogenstrecken. Hierzu gehört zwangsläufig ein Transformator mit einem mehr oder weniger komplizierten Sekundär-Wicklungssystem mit einem Sternpunkt oder Nullpunkt, der für einen Gleichrichter ^{den} Minapol bildet. Die Weiterentwicklung dieses Schaltungssystems für höhere Phasenzahlen von 12 oder 24 führte bei den Gefäßen zu grossen Lichtbogenlängen und bei den Transformatorkonstruktionen zu komplizierten Wicklungsaufbauten mit schwer erreichbarer Mehrphasensymmetrie. Es ist nun bemerkenswert, daß die Umkehr zur Neuentwicklung von Einanodengefäßen, die ursprünglich nur auf die Erreichung kürzerer Lichtbogenlängen abzielte, auch die Transformatorschaltungstechnik aufgelockert hat. Es wurde jetzt möglich, Mehrphasenschaltungen ohne Sternpunkt, sog. Polyganschaltungen, anzuwenden, die gerade solche Einanodengefäße erfordern und bei denen es keine Schwierigkeit mehr bereitet, selbst bei Phasenzahlen über 24 eine völlige Schaltungssymmetrie zu erreichen. Dazu haben sie die Eigentümlichkeit, daß die erreichte Gleichspannung etwa gleich der Durchmesserspannung des Wicklungspolygons, also etwa doppelt so groß wie bei den sog. Sternschaltungen mit Nullpunkt,

-27-

-27-

bei gleicher Teilwicklungsspannung wird. Dafür ist es aber nicht ohne weiteres möglich, solche Schaltungen für mehrfache Anodenbeteiligung zu entwickeln. Sie sind also die gegebenen Schaltungen für Hochspannungsgleichrichter.

Die Vertreterin dieser Schaltungen in der Klasse der Sechphasen-gleichrichter ist die sog. dreiphasige Graetzschaltung, die wir als sechphasige Brückenschaltung bezeichnen. Bei ihr beträgt die Brenndauer der Ventilstrecken 120° bis 60° Zündfolge, wobei jede Ventilstrecke den vollen Gleichstrom führt. Vergleichen wir damit die bekannte Sechphasen-Sternschaltung in der Ausführung als Zweimal-Dreiphasen-Sternschaltung mit Saugtransformator, so haben wir bei ihr ebenfalls 120° Brenndauer der Ventilstrecken bei 60° Zündfolge. Aber hier ist der Gleichstrom ständig auf je 2 Ventilstrecken verteilt, während bei der Brückenschaltung jede Ventilstrecke mit dem vollen Gleichstrom belastet ist. Dafür tritt aber an den Ventilstrecken ^{der} Brückenschaltung keine höhere maximale Sperrspannung auf als bei der genannten Sternschaltung mit Saugtransformator, gleiche Risslungsspannung vorausgesetzt, obgleich ^{sie} die etwa doppelte Gleichspannung liefert wie letztere.

Neben dem eigentlichen Haupttransformator, der oftmals ein System mehrerer Transformatoren ist, besteht die vollständige Stromrichterschaltung noch aus weiteren Bestandteilen. So ist der Haupttransformator oft verknüpft mit einem Regeltransformator mit Stufenschalter, der zur Einregelung der Gleichspannung dient, sofern der Haupttransformator nicht schon selbst mit Regulierstufen ausgeführt ist. Bei Betrieb von Stromrichtergeräßen mit der doppelten, dreifachen oder vierfachen Anodenzahl gegenüber der Phasenzahl der Transformatorschaltung können oftmals Stromteiler-Drosselpulen

-28-

-28-

sur Anwendung, die eine gleichzeitige Stromaufnahme der parallel geschalteten Anoden erwingen wollen. Den gleichen Zweck erfüllt die Ausführung jeder sekundären Transformatorschaltung in mehreren Teilwicklungen, deren gegenseitige Streureaktanzen diejenigen Ausgleichsspannungen liefern, die die gleichzeitige Stromaufnahme der Anode erwingen.

Damit verlassen wir dieses interessante Gebiet, um einige Werte über die notwendigen Hilfseinrichtungen einer vollständigen Stromrichteranlage zu sagen.

In Hilfseinrichtungen einer Stromrichtereinheit.

Zu den Hilfseinrichtungen einer Stromrichtereinheit zählen zunächst die Vorrichtungen für die Zündung und Erregung des Lichtbogens des Stromrichtergefäßes sowie die Einrichtungen für die Gittersteuerung.

Unter Umständen kommen dazu noch Überwachungseinrichtungen für die Kühlung und für die Vakuumhaltung. Bei pumpenlosen Stromrichtern kommt diese im Fortfall.

Den größten Rahmen nehmen aber diejenigen Einrichtungen ein, die den Zweck der selbsttätigen Regelung bestimmter Größen oder der Durchführung von Steuerprogrammen dienen und mit der Störungsbewältigung und mit der Automatisierung bestimmter Betriebsvorgänge zusammenhängen.

So einfach der Bau von Erregerschaltern und Steuerschaltern, insbesondere für die bedienungstechnisch einfachen pumpenlosen Stromrichter an sich ist, so vielgestaltig ist die Ausführung der Einrichtungen für die selbsttätigen Regelungen und verschiedenen Automatisierungen. Es ist unmöglich, im Rahmen dieser Schrift auch nur annähernd auf

-29-

-29-

alle die Probleme einzugehen, die hier zur Diskussion gestellt und mit den Mitteln der Relais-technik und Röhrentechnik in verschiedener Weise gelöst worden sind.

An- und für sich erfordert die Gittersteuerung die Übertragung kurzer Spannungsspitzen mit einer genügenden Flankensteilheit auf die Steuergitter, nur in Ausnahmefällen sind längere Steuerimpulse erforderlich. Außerhalb der Brenndauer der Anoden sind die Entladungsstrecken durch eine negative Gitterspannung gesperrt zu halten.

Mit der Gittersteuerung werden alle Regelauflagen der Stromrichter-technik gelöst, z.B. die Regelung der Spannung, des Stromes, der Leistung, der Drehzahl und der Frequenz. Mit Hilfe von Reglern, wie z.B. Kohledruckreglern, Thomasreglern oder den trügheitslosen Elektronenröhren-Reglern und Strontor- oder Thyratron-Reglern können gleichzeitig mehrere Einflüsse geregelt werden. Dabei ist es möglich, jede gewünschte Kennlinie auszuregeln.

Die Möglichkeit, Stromrichter mit Hilfe negativer Gitterspannung gesperrt zu halten, wird bei der Kurzwellenlöschung besonders ausgenutzt, die z.B. durch schnellwirkende Relais eingeleitet wird. Weitere Besonderheiten besprechen wir bei der folgenden Aufzählung verschiedener Stromrichteranlagen.

6. Ausführung von Stromrichteranlagen.

Wir halten uns bei der nachfolgenden Besprechung der besonderen Ausführungsmerkmale von Stromrichteranlagen an die im 2. Kapitel dieser Schrift gegebene Reihenfolge der Anwendungsbiete.

1. Elektrische Bahnen.

Bei Anlagen für Bahnbetrieb ist zunächst die weitgehende Unabhän-

-30-

-30-

gigkeit des Wirkungsgrades eines Stromrichters von der Belastungshöhe ins Gewicht fallend, da gerade der Bahnbetrieb eine ständig wechselnde Belastung unter Einschluß von Überlastungsschüben bei dem Anfahren eines Zuges mit sich bringt. Gegen die Überlastungsschübe ist ein Stromrichter verhältnismäßig unempfindlich. Da aber auch elektrischmäßig betriebmäßiger häufiger mit Streckenkursschaltern zu rechnen ist, sind als Streckenschalter sog. Schnellschalter vorzusehen, die ursprünglich für den Schutz von Eisenbahnzuförderern entwickelt worden sind, aber nun auch der unentbehrliche Bestandteil der Stromrichter geworden sind.

Schnellschalter sind besonders konstruierte Überstromschalter hoher Schaltleistung für Gleichstrom in einpoliger Ausführung, deren besonderes Merkmal, wie der Name schon andeutet, die hohe Schaltgeschwindigkeit ist. Ihre Aufgabe ist es, einen Gleichstromkursschluß bereits in seinem ersten Entstehen abzuschalten, wozu Abschaltzeiten unterhalb $1/100$ s erforderlich sind, die Zeitdauer der Lichtbogenüberschlagung im Schalter mit eingeschnet. Die eigentliche Ansprechzeit bis zum Öffnen der Kontakte beträgt indessen nur etwa $1/1000$ s. Bei einigen Gleichrichteranlagen mit Gittersteuerung wird der Überstromschutz durch einen solchen Schnellschalter häufig mit der vorhin erwähnten Gitterabschaltung kombiniert. Die Betätigung der Steuergitter durch Aufschaltung einer negativen Gitterspannung erfolgt im Falle innerhalb der sehr kurzen Ansprechzeit des Schnellschalters mittels eines Hilfkontaktees. Die Kurzschlussschaltung durch Schnellschalter allein ist eine sehr plötzlich und deshalb oft mit der Entstehung hoher Überspannungen verbunden. Die Gitterabschaltung arbeitet dagegen über weicher, setzt aber voraus, dass der Stromrichter im entsprechenden Falle tatsächlich steuerfähig ist.

-31-

-31-

Bei Parallelbetrieb mehrerer Gleichrichter werden meist sog. Rückstromschutzschalter verwendet, die bei eintretenden Kurzschlüssen des erkrankten Gleichrichters gleichzeitig abschalten. Bei gesäuerten Gleichrichtern kann man diese Rückstromschutzschalter wieder mit einer Gitterabschaltung der Rückbildung mechanisieren.

Kurzschlüsse sind Störungserscheinungen, die zwar im Augenblick unangenehm sind, vor allem für die dynamische Beanspruchung des zugehörigen Transformators, und die eine völlige Ausserbetriebssetzung des Gleichrichters notwendig machen. Sie veranlassen indes um für den Gleichrichter ^{bliebende} Kurzschaltung von Spulen, was kann diesen praktisch in Bruchteilen einer Sekunde wieder in Betrieb nehmen.

Kommen wir nun zurück auf die weitere Besprechung der Bahn-Gleichrichter-Anlagen, so müssen wir zuerst hervorheben, dass auch gerade bei diesen die mögliche Anzugsdauerlosigkeit der Stromrichter ins Gewicht fällt.

Dazu kommt die Möglichkeit der teilweisen oder vollständigen Automatisierung solcher Anlagen. Zu einer wichtigen Teilaufgabe dieser Automatisierung gehört die selbsttätige Wiedereinschaltung der Gleichrichter-einspeisung bei Streckenturmschützen.

Bei Vollbahnen werden gelagert Wechselrichter den Gleichrichtern beigelegt, die zur Rücklieferung der Bremsenergie an das Bahnstromnetz dienen, wie dies bei Gebügsbahnen von Bedeutung sein kann.

Eine Gleiche unanregung ist bei Bahn-Gleichrichtern ohne Bedeutung.

2. Industrie-le-Antriebe.

Bei industriellen Antrieben steht die Möglichkeit und Notwendigkeit, Gleichstrommotoren verschiedenster Schaltung nach verschiedenen Programmen zu regeln, im Vordergrund. Industrielle Antriebe sind also ein weiteres Betätigungsgebiet d. die Anwendung der Regeltechnik. Was hier

-32-

besonders ins Gewicht fällt, ist die praktische Trägheitsfreiheit und beträchtliche Genauigkeit der bei Stromrichtern erreichbaren Regelungen.

In besonderen werden Antriebe größerer Leistung, von denen ein hoher Drehzahlverbrauch oder häufiges Anfahren, Stillstehen ^{Anlassen + Abstellen} zusammen oder ^{oder} gefordert wird, vorteilhaft als sog. Stromrichter-Antrieb ausgeführt. Bei diesen Reguliertrieben spielt ein gesteuertes Stromrichter den Ankertkreis eines Gleichstrom-Haupt-
eines blausmotors, dessen Feldwicklung konstant erregt wird. Bei einem bestimmten Ankertstrom ist dann das Drehmoment des Antriebs konstant, während seine Drehzahl proportional der angesteuerten Gleichspannung ist. Durch Umdrehen des Motorankers oder des Motorfeldes und Umsteuern des Stromrichters auf Wechselrichterbetrieb lässt sich der Antrieb bis zum Stillstand abbremsen und kann anschließend mit umgekehrter Drehrichtung hochgefahren werden.

Ein bemerkenswertes Beispiel für einen solchen Stromrichterantrieb ist die im Jahre 1937 erbaute Breitbandstrasse der Bandseisen-Walzwerke Duisiaken. Die sechs Walzgerüste der Walztrasse dieser Anlage werden von 6 Gleichstrommotoren von je 200 kW Dauerleistung angetrieben, welche stetsweise auf das Doseite übertragbar sind. Der Ankertkreis eines jeden Walzengangmotors wird vom einer Stromrichteranlage für 600 V, 3000 A Gleichstromleistung gespeist, welche durch Gittersteuerung geregelt wird. Die Feldwicklungen aller 6 Motoren liegen über Nebenschlussregler an einem gemeinsamen Erregernetz, das von einem Gleichrichter gespeist wird.

Die sechs Walzgerüste werden durch μ_{c} in der Stromrichterspannung über die Gittersteuerung aus dem Stillstand hochgefahren und können bei Störungen im Walzbetrieb einzeln oder gemeinsam über die Strom-

-33-

r scheranlagen abgebremst und neu reiszt werden. Dazu wird der Ankerkreis des Motors durch einen druckluftbestückten Trennschalter umgepolzt, nachdem vorher durch Betätigung der Gitteresperrung der Ankerstrom unterbrochen wurde. Im normalen Walzbetrieb sind die Stromrichter auf etwa 90% ihrer Spannung ausgenutzt. Die Feinregelung der Drehzahl der Walzgerüste erfolgt durch Feldänderung der Walzengenotoren mittels ihrer Nebenschlussregler. Die Gittersteuerung der Stromrichter anlässt zu einer Gegenkompensation der Walzgerüstbeschleunigung, welche abhängig von der Belastung des betreffenden Gerüsts und der der übrigen Gerüste erfolgt. Es wird dadurch erreicht, dass die Bruchzahl der einzelnen Gerüste während des Walzvorganges nur ganz wenig abfällt. Außerdem besteht die Möglichkeit, bei zu grosser Schleifensbildung oder bei zu grossem Zug des Walzgutes über zwei Druckknöfe willkürlich in die Gittersteuerung einzutragen und einzelnen Motoren kurze Beschleunigungsschüsse zu geben oder sie etwas zu verstärken. Für diese Eingriffe in die Steuerung ist die Spannungsreserve zwischen 90% und dem vollen Wert der Stromrichterspannung vorgesehen. Die Breitbandstransistorisation war von 1937 bis 1945 in Betrieb und der Stromrichterantrieb hat sich in dieser Zeit gut gemacht.

3. Schweizerische Industrie

Der Elektrolysebetrieb ist bekannt durch das Fahren der Gleisbahnen anlage in Dauerbetrieb bei einem eingeregelten Gleichstrom. Es kommen aber den Vorschlagweise folgend gesteuerte Grossgleichrichter mit selbsttätiger Konstantstromregelung in Betracht. Um den Regelbereich der Gittersteuerung innerhalb festen Grenzen zu halten, wird sie für gewöhnlich ergänzt durch eine grobstufige Regelung mittels eines Kupplungstransformators, der dem Haupttransformator vorgeschaltet ist.

-34-

-34-

Da es sich bei Elektrolyseanlagen um die Aufbringung oft gewaltiger Leistung handelt, die eine erheblichen Teil der Leistung der örtlichen Stromversorgung ausmachen, ist die Oberwellenfreiheit der netzseitigen Wechselströme oftmals von entscheidender Bedeutung. Hierunter kommt es auf die Unterdrückung ganz bestimmter harmonischer der Ströme an, die erfordert, die Anlage für 12-phasigen, 24-phasigen und noch höherphasigen Betrieb auszulegen. Bei Gruppen von Schichtphasen gleich Ichtern erreicht man dies durch z.B. Verwendung von Transformatoren mit verschiedenen geschalteten Primärwicklungen oder durch Verwendung von Schranktransformatoren, die die erforderlichen Drehzahlen, z.B. um 30% oder 15% bewerkstelligen.

4. Senderstromversorgung.

Die Senderstromversorgung bedeutet ebenfalls kontinuierlichen Dauerbetrieb, jedoch bei gleichbleibender Gleichspannung. Wie bereits gesagt worden ist, beträgt die erforderliche Anodenspannung der Senderöhren bis 20 KV und darüber.

Ein besonderes Kennzeichen dieser Sendung, Jahr daher ist die Notwendigkeit einer Schutzreaktion gegen die häufig an den Senderöhren stattfindenden Überschläge, die für den Gleichrichter vorübergehende Kurzschlüsse bedeuten. Diese Einrichtung bewirkt eine kurzdauernde Sperrung des Gefäßes mit auf der nachfolgendem Hochregeln der Anodenspannung der Röhre, wobei der ganze Vorgang weniger als 1 Sekunde dauert, so dass er von den Hörern kaum oder nur als Ausfall einer Silbe oder eines kurzen Wortes wahrgenommen wird.

5. Das Blindleistungsproblem.

Es wird erwidern, der welche nach nun die Besonderheiten der Stromrichteranlagen für alle weiteren Anwendungsbiete aufzuzählen. Stattdessen

-35-

-35-

dessen soll noch eine allgemeine Frage der Gittersteuerung erörtert werden.

Sie bereits mehrfach gesagt worden ist, bedeutet die Gittersteuerung die Beeinflussung einer Kathodenstrahlstrecke in dem sie den Stromdichten bestimmt, in dem sie normalerweise bei Positivwerden der Anodenspannung ständen würde. Hierbei kann bejouten, dass durch negative Gitterspannung verhinderten Strahlauftreff auf eine spätere Zeitpunkt zu verschieben oder vorzeitig zu unterdrücken. Ersteres kommt bei A selungen all z Art oder bei Wechselrichtern und Gleichrichtern zur Ermöglichung ihres Betriebes in Betracht, letzteres bei Schutz gegen Überströme oder sogenannte Störungen, wie Rückständungen oder Durchschlägen. Während bei Gleichrichteranlagen ein Ver sagen der Gittersteuerung nur eine Veränderung ihres Betriebszustandes nach sich zieht, so dass es bei einem Wechselrichter ein Ver sagen der Kommutierung oder der Anodenableitung, was einen drehstromartigen Kurzschluss zur Folge hat. Das spricht dann von einem Kippen des Wechselrichters.

Gleichviel wie immer mit der Gittersteuerung beabsichtigt wird, gibt es Gründe, die technischen Möglichkeiten der Gittersteuerung nicht genauso zu übersehen. Auch eine als solche Gittersteuerung, etwa zur Spannungsregelung eines Gleichrichters, bedeutet eine Vereinfachung der schaltungstechnischen Anschlüsse aus den Spannungsbahnweichen der dreistromseitigen Wechselstromanlagen. Dies bedeutet in der Regel eine Zunahme der Gleichspannungsabwesenheit. Außerdem entsteht aber eine zeitliche Verlagerung der Anodenströme und damit die gleiche Verlagerung der Leistungströme. Ihre Grundwelle erfährt eine Phasenverschiebung im nachteilenden Sinne, der Gleichrichter nimmt Blindleistung aus dem Netz. Das ist nicht wünschbar, denn bei gleichbleibendem Gleichstrom und horstgeregelter Gleichspannung nimmt die

-36-

gleichstromseitig gelieferte Wirkleistung ab, während die Scheinleistung auf der Netzeite unverändert bleibt. Die Veränderung der Gleichspannung bedingt also die Entnahme von Blindleistung aus dem Netz.

Dies hat eine gewisse Abhängigkeit mit der Eigentümlichkeit der Wechselspannungsregelung mittels eines Drehturmsverstärkers, der ebenfalls eine Phasenverschiebung des Netzzentrals verursacht. Aber hier ist dies möglich, je nach der Verstellung des Drehturmsformfaktors eine nachteilende oder vorteilhafte Phasenverschiebung einzustellen, und durch Kombination zweier solcher Transformatoren ist es möglich, die Phasenverschiebung durch den einen mit der Phasenverschiebung durch den anderen zu kompensieren. Dies ist bei Stromrichtern unter normalen Bedingungen nicht möglich. Die Komplikation der Anodenströme setzt vorne, dass die Anodenspannung der ablaufenden Anode positiv gegenüber der der gerade treibenden Anode ist und das ist nur zur Steadycirculation der Gittersteuerung möglich.

Beschleunigungen

Es sind nun allerdings Verfahren entwickelt worden, diese Verzögerung aufzuheben und z.B. den Gitterstrahler auch bei Zündverzögerung der Gittersteuerung ohne Komplikation seiner Anodenströme zu verhindern.

Mit solchen Mitteln ist es möglich, Wechselrichter, die wegen ihrer besonderen Komplikationsbedingungen, die schon unzulässige Zündverzögerung vom etwa 40° verringern müssen, wobei sie sich blindleistungsmässig genau so bewirken wie die Zündanordnung auch bei Stromrichtern, mit konstanter Blindleistung zu führen oder sogar zu steuern, dass eine induktive Blindleistung in den Drehstromnetz hinzugefügt.

Mit diesen Strukturen der im Fluss befindlichen Kraftig in Weiterentwicklung, die auch bestrebt ist bei Anlagen für 1100 Wechselspannungs-Gleichstrom-Umspannung von Bedeutung ist, soll dies erläutert werden in die

Technik der Gitterzersetzung besprochen werden, und wir wollen nun noch einige Forte zur Meßtechnik der Stromrichter sagen.

6. Stromrichter-Meßtechnik.

Die Untersuchung und betriebssichige Überwachung einer Stromrichteranlage und ihrer Teile erfordert Meßgeräte und Einrichtungen, wie sie die Meßtechnik für allgemeine Anwendungszwecke im grossen Rahmen bereits entwickelt hat. Hierzu rechnen neben Spannungs- und Strommessern und Leistungsmessern der Schleifenoszilloskop und der praktisch unentbehrliche Elektronenstrahloszilloskop. Außerdem gibt es seltener angewandte Meßgeräte, die bereits fertig entwickelt sind und für Stromrichteranlagen gelegentlich von Bedeutung sein können. Solche sind z.B. die Gerd e. zur Messung des Oberwellengehalts von Spannungen oder Strömen bzw. zur Messung von Spannungen Harmonischen des dritter Ordnung. Ferner gibt es Geräte, die schon mehr unmittelbaren Anwendungen für Stromrichter entgegen sehen, wie z.B. der Gleichstromwandler, ein Stromwandler mit zwei Eisenkernen mit einem Magnetisierungskern, der die Schaltung auch der Gleichstromkoskopie eines Stromes gestattet.

Meßeinrichtungen, die indessen schon ausschließlich für die Bedienung der Stromrichterüberspannung entwickelt und in verschiedenen Ausführungen für sie gebaut worden sind, sind die Vakuummeter. Sie sind nicht nur als direktanzeigende Metergeräte, sondern auch als signalkundliche Apparate ausgebildet worden. Mit dem Aufkommen der punktförmigen Stromrichtermesse, die keine Vakuummeter benötigen, hat das Interesse an diesen Geräten nachgelassen.

Mehr noch als die Höhe des Vakuum ist jedoch die Brennspannung des Lichtbogens des im Betrieb befindlichen Stromrichters für die Beurteilung eines gewissen Arbeitszustandes ausschlaggebend. Es ist daher notwendig, Meßgeräte zu konstruieren, die eine Spannung bis zu XXXXXXXX, XX-X-XX.

-38-

eines geminderten Arbeitszustandes ausschließen. Es ist daher notwendig, Messgeräte zu entwickeln, die die Brennspannung unmittelbar zur Anzeige bringen. Diese gilt umso mehr für punktlose Stromrichter, die mit dem Fürtfall des Vakuummeters keinerlei Kontrollmöglichkeit für ihre innere Beschaffenheit mehr haben.

Bisher war man gezwungen, die Brennspannung wattmetrisch zu bestimmen, was wegen des Angriffs in die Strombahnen mittels Spezialwandlern und zu weiteren Gründen unzulänglich ist und nur im Prinzip vertretbar ist, ganz abgesehen davon, dass sich die Brennspannung erst aus einer Division einer Wattmeterablösung durch eine Strommesserablösung ergibt. Es sind bereits Methoden vorgeschlagen worden, die eine rein spannungsmässige Messung der Brennspannung in Verbindung mit einem direktzeitigen Messinstrument ermöglichen. Sie beruhen auf der zweckdienlichen Anwendung gesuchter Wöhren, die aus der Spannung zwischen Anode und Kathode, die während der Lichtbogenbrenndauer die Brennspannung, im übrigen aber eine gänzlich andere teils positive, teils negative Spannung vorstellt, gerade die Brennspannung herauszuschneiden. Indeedem muss diese messtechnische Herauslösung der Brennspannung nicht über ihre ganze, in gewissen Verhältnissen iache Brenndauer erfolgen, sondern über eine rechte Zeit, die ein ganzzahliges Bruchteil der Periode ist, denn nur dann ist das Messinstrument in Vollbetrag der Brennspannung fest sichtbar. Daneben gilt es, die unter Umständen sehr hohe Sperrspannung während der Lichstdauer des Meßgeräts fernzuhalten, ohne die Messgenauigkeit der Uiformordnung zu beeinträchtigen.

Bei einem derartigen Gerät macht es keine Schwierigkeiten, anomale Veränderungen der Brennspannung zur unmittelbaren Stromregelung aus-

-39-

zunutzen. Im übrigen ist es angebracht, das Brennspannung-Voltmeter selbst genau fast innerhalb des Bedienungsfeldes der Anlage zu installieren wie die üblichen Strom und Spannungsmesser für die äusseren Betriebsgrössen der Anlage.

2. Orientierende Angaben für die Planung einer Stromrichterfabrik.

Es soll nun abschliessend ein Plan für die unter den gegebenen Verhältnissen gebotene und mögliche Fertigung von pumpenlosen Stromrichterapparaten mit einer Leistung von fast werden.

Ein Program für die in den nächsten Zukunft zu erwartende Gefechtseentwicklung ist auf der nachfolgenden Tabelle zusammen gestellt. Die darin aufgeführten Positionen sind bereits während des Krieges bei der RWE und bei SEM im Entwicklungsbereich gewesen oder bereits zu einem gewissen Abschluss gekommen. Da überhaupt wurden in den letzten Jahren Versuche zur Steigerung der Gefechtseleistung angestellt auf Grund von Überlegungen, zu deren Verwirklichung es während des Krieges nicht mehr gekommen ist.

Hier ist vor allen Dingen die Entwicklung von vakuumdichten Elektroden durchführbar zu nennen, bei denen auf die Verwendung legierter Stähle verzichtet werden kann. Ferner erwähnen wir die Entwicklung einer quecksilberenen Kathode, bei der die Verlustspannung und damit die Beanspruchung der Kondensationsflächen auf einen Bruchteil der sonst zu erwartenden reduziert werden kann.

-40-

Programm für die Gefäßentwicklung.

Pos.	Bezeichnung	Type -	Anwendungsbereich
		Leistung	
a)	Kathoden pumpenlos, wa. luftgekühlt	600 V 300 A 1500 V 2000 A 3000 V 1000 A	Elektrolyse, elektrische Bahnen
b)	Sextenkathode pumpenlos, luftgekühlt	600 V 600 A	Elektrische Bah- nen, Antischiebe
c)	Sextenkathode pumpenlos, luftgekühlt	600 V 1500 A 1500 V 800 A 3600 V 500 A	*
d)	Sextenkathode für Hochspannung pumpenlos, luftgekühlt	12000 V 100 A 24000 V 50 A	Sendeanlage
e)	Kathoden f. Hochspannung pumpenlos, wa. luftgekühlt	16000 V 600 A	Lichtbogenofen
f)	kleines Einapparationsgefäß für Schweißzwecke		
g)	Ignitrongefäß	6er Satz 400 V 1000 A 400 V 2000 A max	Industriemotz Schweißen... ...

-41-

-41-

Für die Produktionskapazität des Stromrichterwerkes wird die Annahme gemacht, dass im Jahr

800 Stromrichter je 1000 - 1 200 KW
gefertigt werden.

Zu jedem Stromrichter gehören die Hilfsbetriebe, das sind die Einrichtungen für: Zündung, Regelung, Sicherstellung, und Kühlung.

Die übrigen zu einer Stromrichteranlage erforderlichen Apparate und Geräte werden von anderen Werken geliefert.

(Die beiliegende Anlage zeigt die zur Fertigung vorgesehenen Stromrichtertypen.)

Für die Planung wird in vereinfachende Annahme gemacht, dass nur passivlose zirkularwellige sechsspannige Stromrichter gebaut werden. Die Möglichkeit 16, verschiedene Stromrichtertypen zu fertigen, wurde durch Zuschläge von 1 - 20% zu den Zahlen für Arbeitstunden, Material-, Raum- und Werkseinrichtung berücksichtigt. Die Zahlen wurden durch Erfahrungswerte aus früher existierenden Stromrichterwerken gewonnen.

In Arbeitskraft bei

Aus den Fertigungszeiten für einen Stromrichter und dem Jahresfertigungsprogramm wurde der Bedarf an Arbeitskräften festgestellt. Dabei wurde mit Rücksicht auf die hohe Zahl von Fachkräften nur zweischichtbetrieb angenommen. Daraus ergibt sich eine Werksbesetzung von

20 Ingenieuren,
40 Technikern
40 Angestellten
60 Facharbeitern
130 angelernten Arbeitern

zusammen..... 310 Mann.

-42-

-42-

2. Werkstatt einrichtung

Das Fertigungsprogramm erfordert die Einrichtung von Schlosserei, Schreinerei, Fräserei, Bohrerei, Werkzeug- und Vorrichtungsbau, Schweißerei, Schleiferei, Montage, Strukturerie, Waschraum, Ofenraum, Kontrollwerkstatt, Wickelrei, Prüffab., Betriebswerkstatt, Materialprüfstellc und Laboraufzonen.

Der Geldaufwand dafür ist:

Maschinen	250.000,-
Spezialeinrichtungen	185.000,-
Werkfeldseinrichtungen	30.000,-
Werkzeuge, Transportgeräte, Schaltstation, Bürosinrichtungen usw..	245.000,-
	1.050.000,-

3. Raumbedarf

Fertigungs- u. gr. und Werkstatt einrichtung vorliegenden Fabrikationsräume von ca. 4000 qm (ca. 200 Längen), da es ein Drittel im Erdgeschoss in einer lichten Höhe von 3-6 m, der Rest in einer Höhe von 4-5 m. Es wird damit gerechnet, dass vorhandene Fabrikräume zu einem kleinen Preis gemietet werden können.

4. Materialbedarf

Für 2000 Stromräder ergibt sich ungefähr folgender Materialbedarf:
140 t Eisen, und zwar Tiefsicht. ob, Feinsicht, Mittelsicht, grobsicht, Planchisen, Wandisen.

10 t saftloses Stahlrohr

6 t Quetschbänder

5 t Elektroden, zfit

-43-

-44-

zu verarbeitende Bauteile

15 kg Molybdän

Basiskosten: Halbfabrikate aus Porzellan, Quarz, Zirconia, Stenit, Hartpapier

Fertigfabrikate, wie Kleinsttransformatoren, Drosseln, Schalter, Relais, Instrumente, Transistorschreiber, Widerstände, Kondensatoren.

5. Rentabilitätsberechnung:

a) Einnahmen:

	DM	DM
200 Stromrichter je DM 20.00,-		4.000.000,-

b) Ausgaben:

Gehälter und Löhne	1.710.000,-
Fertigungsmaterial	1.054.000,-
Verbrauchsmaterial	650.000,-
Miete	60.000,-

Investition:

Werkausbau	1.050.000,-
Werkseinrichtung	150.000,-
Anlaufkosten	500.000,-
Sicherheitsauschüttung	150.000,-

20% Amortisation	396.000,-	<u>3.850.000,-</u>
------------------	-----------	--------------------

c) Fertigungsaufwand 5,8%

150.000,-